典型无序结构芯体夹层梁的振动特性试验分析

黄磊[1,2],岳晨冲[2],李斌潮[2],张志家[1],张钱城[1],金峰[1]

(1. 西安西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,710049 西安;
2. 西安航天动力研究所液体火箭发动机技术国防科技重点实验室,710100 西安)

摘　要:通过悬臂梁模态试验研究了典型无序芯体(纤维毡、闭孔泡沫铝以及开孔泡沫铝)夹层结构的振动特性,并与夹层结构所对应等质量钢板进行振动特性对比分析。研究结果表明:无序芯体夹层结构相较于对应等质量钢板均有着更高的前三阶固有频率和阻尼比;等质量钢梁任一横截面上各点具有相同振动特性,而夹层结构任一横截面上各点振动特性受芯体结构影响较大。

关键词:无序芯体;夹层结构;模态分析;固有频率

中图分类号:TB33　　　　**文献标志码:**A

Experimental analysis on vibration characteristics of sandwich beams with typical disordered porous metal cores

HUANG Lei[1,2],YUE Chenchong[2],LI Binchao[2],ZHANG Zhijia[1],ZHANG Qiancheng[1],JIN Feng[1]

(1. State Key Laboratory for Mechanical Structure Strength and Vibration,Xi'an Jiaotong University,710049 Xi'an,China;
2. State Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Rocket Engine,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute,710100 Xi'an,China)

Abstract: The vibration characteristics of sandwich structures with typical disordered porous cores (i. e. , fiber felt,closed-cell aluminum foam,and open-cell aluminum foam) were analyzed through laboratory modal tests of sandwich cantilevers with fixed end boundary conditions applied at a free end. It was found that compared with the corresponding steel plates of the same mass,the sandwich beams with disordered porous metal cores have higher natural frequencies and damping ratios at the first three modes. Any cross section of the steel beam has the same vibration characteristics on its all points,but all points of vibration characteristics of sandwich beams at any cross section depend on the common influence of relative density and peak strength.

Key words:disordered cellular core;sandwich structure;modal test;natural frequency

无序结构芯体夹层结构(芯体包括纤维毡、闭孔泡沫铝以及开孔泡沫铝)由于具有高比刚度、比强度、高吸能以及隔热、吸声等功能特性[1-5],已被部分运用于高速列车、航空航天、舰船、数控机床等领

收稿日期:2021-03-10　　　　**修回日期:**2022-01-15

基金项目:装发部预先研究项目(No. 41410040202);机械结构强度与振动国家重点试验室开放课题(No. SV2019-KF-28);基础加强计划技术领域基金(No. 2019-JCJQ-JJ-480);陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(No. 2020KJXX-020)

通信作者:张钱城,博士,研究员。E-mail:zqc111999@xjtu.edu.cn

引用格式:黄磊,岳晨冲,李斌潮,等. 典型无序结构芯体夹层梁的振动特性试验分析[J]. 应用力学学报,2022,39(2):262-267.
HUANG Lei,YUE Chenchong,LI Binchao,et al. Experimental analysis on vibration characteristics of sandwich beams with typical disordered porous metal cores[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):262-267.

域[6-7]。上述工程领域大都存在着极为复杂的力学(包括振动)工作环境,无序结构芯体夹层结构的相关研究仍方兴未艾。

目前国内外已对无序多孔材料的动、静态力学性能开展了大量理论与实验研究。马军等[8]实验研究了316L不锈钢纤维烧结毡的变形能、杨氏模量、强度等力学性能与材料相对密度之间的本构关系。实验结果表明,金属纤维烧结毡沿面内方向的拉伸断裂能和压缩变形能与相对密度分别成线性关系和幂大于1的抛物线关系。金属纤维烧结毡沿面内方向拉伸或压缩时的模量和强度与材料相对密度均成线性关系。潘艺等[9]利用分离式霍普金森压杆(SHPB)和MTS810材料试验机对多组孔径、多组密度的开孔泡沫铝合金(AA6101)材料进行了准静态与动态压缩实验研究。康颖安[10]采用试验研究和理论分析相结合的方法研究了两种不同胞孔结构的开孔与闭孔泡沫铝的准静态压缩、拉伸以及动态压缩载荷下的基本力学性能,以此为材料制备和工程应用提供理论依据。无序多孔材料因存在大量孔洞而具有能量吸收及阻尼作用。何柏灵等[11]采用哈密尔顿方程和加权伽辽金法获得夹芯结构振动方程,同时求出夹芯板的固有频率并与有限元计算结果进行比较,二者吻合很好。朱秀芳等[12]研究了负泊松比蜂窝夹层板几何参数变化对板振动频率的影响,并得到了频率随泊松比的变化规律。马超等[13]考虑夹心抗弯刚度和材料拉压不同模量特性,修正了软夹心夹层结构的基本假设。在此基础上,推导了拉压不同模量硬夹心矩形夹层板弯曲的基本方程和边界条件,给出了在四边简支条件下的解析解。王鹏飞等[14]以Timoshenko梁理论为基础,建立了泡沫铝板弯曲振动的理论模型,求解得到了泡沫铝板弯曲振动频率与振幅变化曲线,并通过有限元仿真验证了理论分析结果。肖登宝等[15]研究了金属梯度多孔夹芯板振动特性,基于高阶夹芯板理论且考虑梯度多孔芯层密度和弹性模量的耦合影响,建立了复合材料面层-金属梯度多孔夹芯板的振动方程,计算结果表明,梯度芯层密度对称分布的夹芯板固有频率大于单向分布的夹芯板固有频率。马银行等[16]研究了闭孔泡沫铝板的非线性振动特性,结果表明:由于闭孔泡沫铝存在大量不规则孔洞结构,导致其振动响应具有明显的非线性,表现为同一振动模态对应于数个谐振激励频率,是典型的超谐振。

目前对于无序多孔材料作为芯体的夹层结构振动特性研究还较少,特别是开孔泡沫铝和金属纤维毡芯体夹层结构振动特性研究,需要进一步深入研究。针对这种情况,本研究讨论不同无序多孔芯体夹层结构振动特性,并对无序多孔夹层结构进行悬臂梁模态试验,对比分析各芯体夹层结构固有频率和阻尼比。

1 试样制备及模态试验

1.1 试件的制备

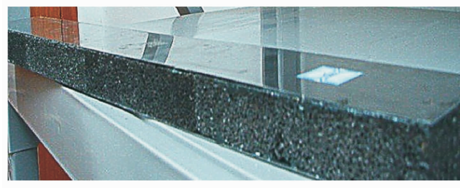
悬臂梁夹芯结构所采用的实体面板材料为304不锈钢(Fe-18Cr-8Ni),芯体材料分别为孔隙率为90%的不锈钢纤维毡、孔隙率为78%的闭孔泡沫铝和孔隙率为72%的开孔泡沫铝,结构几何参数列于表1。首先将304不锈钢板材、不锈钢纤维毡和泡沫铝板材通过线切割切割成设计尺寸,同时线切割制备与夹芯梁相对应的等质量钢板。面板与芯体通过铸工胶(江苏泰春粘接剂有限公司,江苏)粘接。施胶后,在温度为60 ℃恒温固化1 h,然后再调至50 ℃继续恒温固化1 h,最后置于室温下,完成剩余的固化,制备的夹芯梁试件如图1所示。



(a) 孔隙率90%纤维毡夹层结构



(b) 孔隙率78%闭孔泡沫铝夹层结构



(c) 孔隙率72%开孔泡沫铝夹层结构

图1 夹层悬臂梁结构

Fig. 1 The sandwich cantilever structures

表 1　无序芯体夹层结构参数

Tab. 1　Parameters of the disordered core sandwich structures

试件名称	面板/mm	孔隙率	总质量/g	总尺寸/mm^3	等质量钢板/mm
纤维毡夹心夹层梁	1	90%	1 480	600 × 70 × 27.2	4.5
闭孔泡沫夹心夹层梁	1	78%	1 360	600 × 70 × 28	4.2
开孔泡沫夹心夹层梁	1	72%	1 520	600 × 70 × 27.5	4.7

1.2　模态试验

悬臂梁振动试验平台及传感器布点如图 2 所示，振动信号采集系统主要由加速度传感器、力传感器、信号采集分析仪等组成，配置清单如表 2 所示。测试前，首先将 6 个加速度传感器在设定位置用快干胶与试件粘接，将悬吊的电磁激振器安装于试件上，加速度传感器与激振器的布点位置如图 2 所示，最后将激振器信号线、各加速度信号线与 BK3560D 采集系统相连接。触发后，各个加速度传感器和电磁激励器的力传感器的信号被传送到电荷放大器，电荷放大器连接到数据采集板和 PC 机上进行模态识别。本次试验所采取的方案为：先进行白噪声激励，初步确定夹层结构的前三阶固有频率；然后采用扫频法，调节频率分辨率到 0.125，对各阶固有频率进行更为精细地采集与分析。

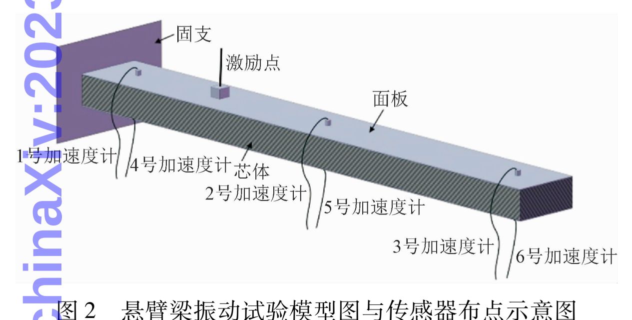


图 2　悬臂梁振动试验模型图与传感器布点示意图

Fig. 2　The experimental model diagram of cantilever beam vibration and the schematic diagram of sensor placements

表 2　振动采集与分析仪器

Tab. 2　Natural frequency and instruments

仪器仪表	型号	数量
加速度计	BK4366	6
力传感器	PCB208C02	1
信号发生器	BK3560D	1
信号采集分析仪	BK3560D(48chs)	1
电磁激振机	BK4809(44.5 N,736 m/s^2)	1

1.3　试验数据分析

该试验的目的是得到夹层结构的前三阶共振频率以及阻尼比。由加速度计测量得到的信号经过 Pulse 软件本身自带的 FFT，可将时域信号转化为频域信号，可根据软件中 Function group 选项得到各加速传感器测量信号自功率谱以及加速度导纳曲线。所谓加速度导纳就是指在单自由度系统中加速度在单位力激励下的频率响应[15]，如图 3 所示，数学表达式为

$$Y_A = \frac{A}{F} = \frac{(j\omega)^2 X}{F} = \frac{\frac{1}{m}e^{j\beta}}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\Omega_n}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\Omega_n}{\omega}\right)^2}} \tag{1}$$

式中：$\Omega_n^2 = \frac{k}{m}$，$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$。由式(1)可知，当振动频率 ω 等于 Ω_n 时，加速度曲线达到最大值(小阻尼条件)，这就是该单自由系统的共振频率，即固有频率。而根据半功率点法，即找到加速度导纳为其峰值的 $1/\sqrt{2}$ 倍两个频率点 ω_L 与 ω_H，即可根据式(2)计算所得阻尼比，即

$$\zeta = \frac{\omega_H - \omega_L}{2\Omega_n} \tag{2}$$

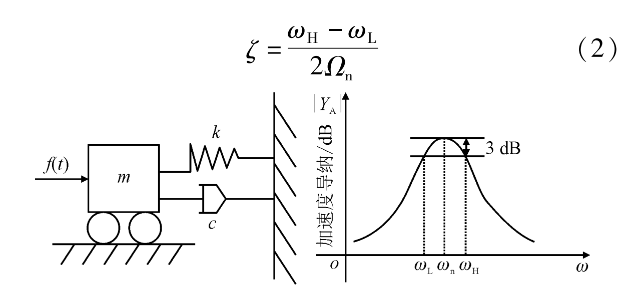


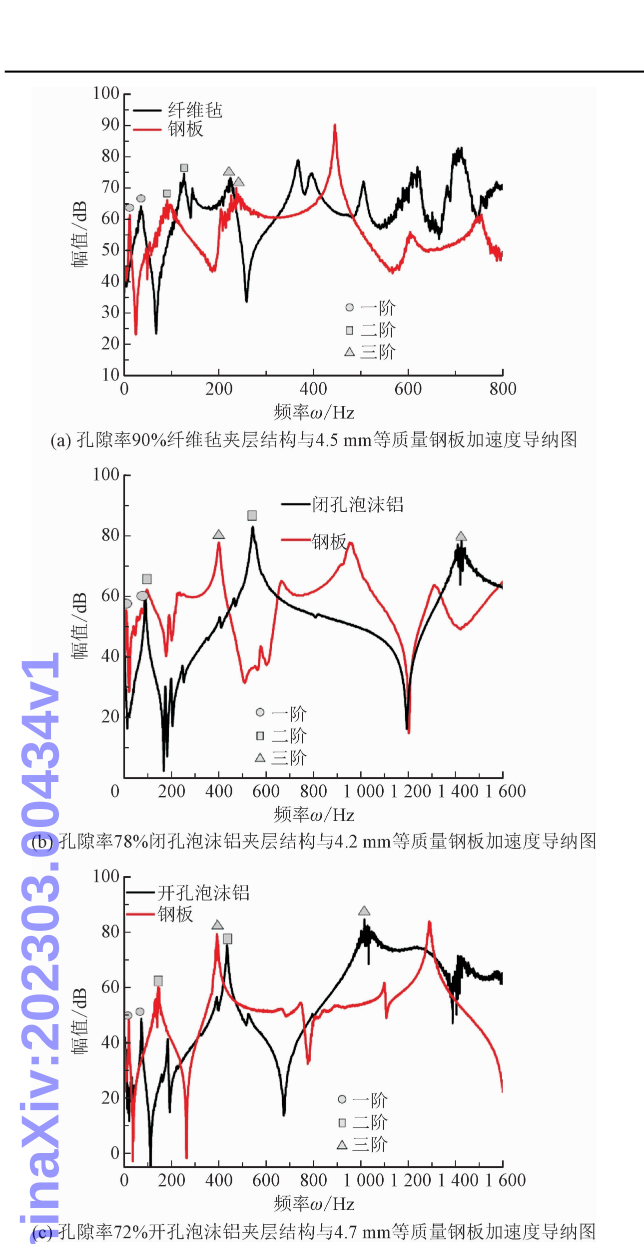
图 3　单自由度系统与加速度导纳曲线

Fig. 3　Single degree of freedom system and acceleration admittance curve

2　结果分析与讨论

2.1　不锈钢纤维毡夹层结构的固有频率与阻尼比

通过对悬臂梁进行 0 ~ 1 600 Hz 白噪声激励，可得到孔隙率为 90% 的不锈钢纤维毡、孔隙率为 78% 的闭孔泡沫铝和孔隙率为 72% 的开孔泡沫铝 3 种夹层结构与等质量钢板的振动响应曲线，如图 4 所示。为了得到更加精确的夹层结构固有频率与阻尼比，通过分段扫频的方法得到了各夹层结构的前三阶固有频率和阻尼比，如表 3 所示。



(a) 孔隙率90%纤维毡夹层结构与4.5 mm等质量钢板加速度导纳图

(b) 孔隙率78%闭孔泡沫铝夹层结构与4.2 mm等质量钢板加速度导纳图

(c) 孔隙率72%开孔泡沫铝夹层结构与4.7 mm等质量钢板加速度导纳图

图4　各夹层结构与等质量钢板的白噪声频率响应曲线

Fig. 4　White noise frequency response curves of sandwich structures and their corresponding steel plates of the same mass

由图4可知,无序芯体夹层结构的前三阶固有频率都大于等质量钢板的固有频率,并且悬臂梁夹层结构振动的固有频率变化规律不再等同于各向同性悬臂梁固有频率随阶数平方递增的变化关系。另一方面,3种无序芯体夹层结构质量相差无几,但闭孔泡沫铝夹层结构其各阶固有频率仍然高于开孔泡沫铝和纤维毡夹层结构,这表明闭孔泡沫铝在单位密度下有着更高的抗弯刚度,因而,悬臂梁夹层结构芯体类型会影响到结构的固有频率。而在阻尼比方面,无序芯体夹层结构第一阶阻尼比低于其等质量的钢板。这里值得注意:钢板在一阶的测量阻尼比为0.01 ~0.020,这并不是一个真实的量值,根据文献[15]可知,钢板结构的阻尼比量级通常为0.000 1 ~0.002左右,说明钢板一阶频率的扫频测量存在大的误差,主要的原因是在一阶低频下,扫频速度太快,使得悬臂梁振动无法达到稳定响应,从而产生误差。通过对比二阶和三阶的阻尼比,可以得到夹层结构具有更好的阻尼特性。其中,纤维毡夹层悬臂梁结构阻尼比随阶次升高逐渐增大,但明显小于泡沫夹层结构。开孔泡沫铝在三阶的阻尼比达到了10^{-2}这个量级,表明该材料在共振处,有着优于闭孔泡沫铝夹层结构的阻尼特性。由文献[16]可知,材料自身的阻尼称为结构阻尼,它是由于非弹性材料振动过程中的内摩擦所造成,这与材料自身特性相关,因此同为铝制备而成的开孔和闭孔泡沫铝,尽管孔隙率不一样,但其阻尼比在各阶应该具有相同的量级,可是从表3的结果可以发现,开孔泡沫铝在三阶处的阻尼比远高于闭孔泡沫铝夹层结构,其原因是开孔泡沫铝振动时,带动空气流动所产生的流体阻尼所引起,显然闭孔泡沫铝不具有这种优势。

表3　夹层结构与等质量钢板的固有频率与阻尼比

Tab. 3　Natural frequency and damping ratio of sandwich structures and the corresponding steel plate of the same mass

芯体类型	阶数	夹层结构		等质量钢板	
		固有频率/Hz	阻尼比	固有频率/Hz	阻尼比
孔隙率90%纤维毡	一阶	35	0.001 6	12.75	0.010 0
	二阶	121.5	0.004 0	82.875	0.000 3
	三阶	247.7	0.005 2	233	0.000 2
孔隙率78%闭孔泡沫铝	一阶	93.125	0.003 6	11.875	0.008 0
	二阶	548.125	0.009 1	78	0.004 6
	三阶	1 419.5	0.004 7	217.625	0.002
孔隙率72%开孔泡沫铝	一阶	74.75	0.007 8	12.625	0.013 4
	二阶	436	0.005 0	93.125	0.001 1
	三阶	1 023.625	0.043 6	240.625	0.000 6

2.2　振动传递特性

模态试验中采用了6个加速度传感器,分别布置于夹层结构与等质量钢板的上下面,并且配对加速度传感器具有相同的横坐标,希望观察各自配对加速传感器所测量出的加速度导纳值不同,来反映芯体对于悬臂梁振动的影响。根据式(2)对时间求二阶导数,可以看出对于任意的欧拉梁在相同横坐标,其上下表面应具有相同的加速度,反映在试验中即等质量钢板配对加速度传感器信号所测量的加速度导纳值在各频率点相等,而无序芯体的夹层结构由于芯体的存在需要通过试验进行分析,这里先给出各无序芯体夹层结构与等质量钢板配对加速度传感器的导纳比值,如图5所示。

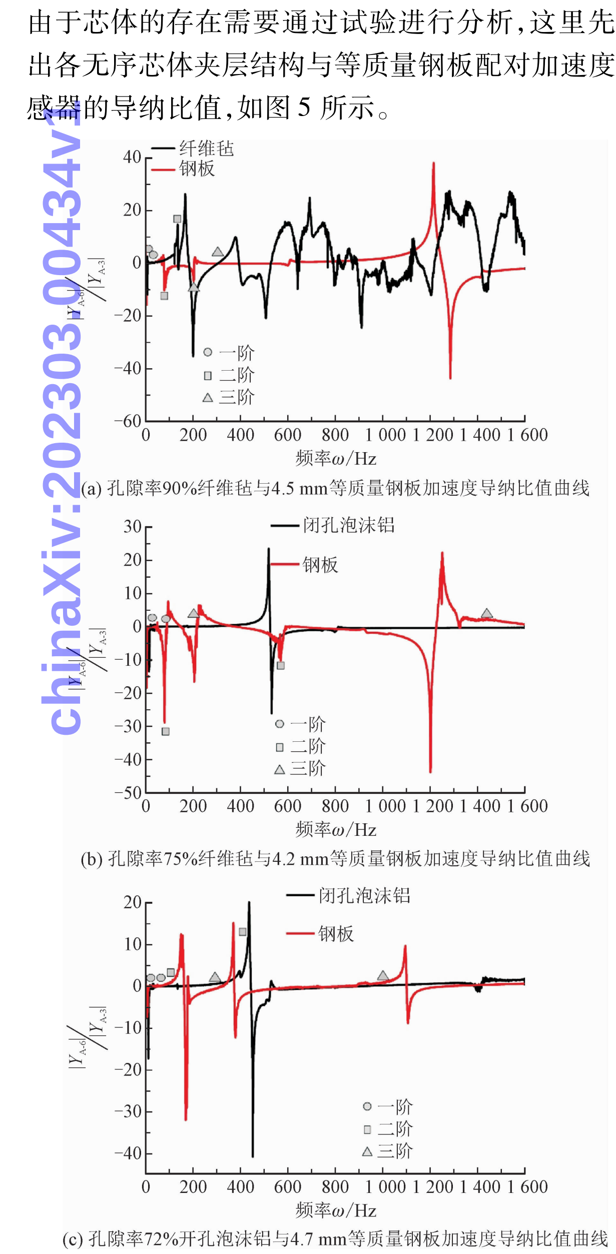


图5　加速度导纳的比值曲线

Fig. 5　Ratio curve of acceleration admittance

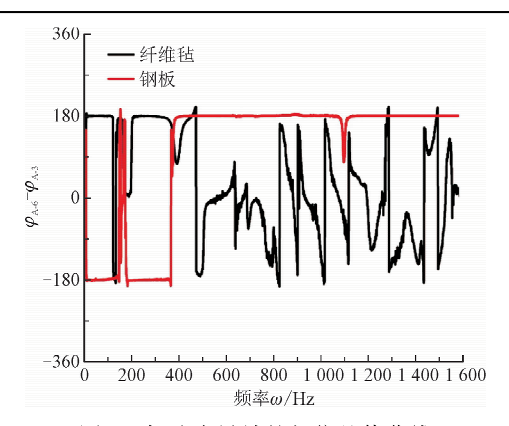


图6　加速度导纳的相位差值曲线

Fig. 6　Phase difference curve of acceleration admittance

由于所绘制的是对数坐标曲线,由6号加速度传感器所测得的加速度导纳值与3号传感器所测得的加速度导纳值相减,实质上是两个加速度导纳幅值之比。由图5(a)~图5(c)中可以清楚地看到,等质量钢板所测加速度导纳比值在0~1 600 Hz频率范围内的大部分都为零,表明上下面板对应的加速度幅值相同,验证了由欧拉梁所得方程对时间求二阶导数所得到的推论。而对于无序芯体夹层结构,闭孔与开孔泡沫铝的加速度幅值曲线与等质量钢板所得到的结果一致。而对于纤维毡夹层结构,其加速度导纳比值随频率在0处发生上下波动,这在以往的悬臂梁振动中还未有研究。为分析这一现象,本研究引入与图5(a)所对应的相位差(图6)进行分析,其反映了3号、6号位置处在同频率所对应的加速度方向。

由图6可知,对于等质量钢板,其上下位置处的加速度相位差为±180°,其中"±"揭示了两位置加速度位置超前与落后的概念;而"180°"说明两位置加速度传感器所测量加速度方向相反。但是需要再次审视试验设计,3号与6号加速度传感器分别贴于试件的上下板面,造成了测试方向相反,因此,相位差180°说明两位置处加速度方向相同,这也与理论相符合。对于孔隙率为90%的纤维毡夹层结构,不同的频率,这二者的相位差值位于-180°与+180°之间,这说明二者的加速度方向并不相同,而且不共线(共线对应于0°和±180°)。上下面板对应位置的加速度大小与方向都不相同,这说明对于纤维毡夹层结构,上面板的激励并不能完全传递到下面板,而是经过夹芯时发生了改变,同时对比图5(b)与图5(c),也可以看到芯体的强度和致密性正是这一现象发生的主要原因。理论上,这种现

象对于夹层结构的振动响应且有积极效果,因为上下面板的不协调振动会引起振动的相互制约,从而减弱了夹层结构的共振幅值。图 5 中采用三角、方块与椭圆形标注了无序芯体夹层结构与等质量钢板的前三阶固有频率位置,可以看到对于任何悬臂梁,在二阶固有频率位置处都会发生加速度导纳比值的变化。

3 结　论

首先通过 0 ~ 1 600 Hz 的白噪声激励频响曲线初步分析了 3 种无序夹层结构与等质量钢板的固有频率和阻尼特性,无序夹层结构相较于对应等质量钢板均有着更高的前三阶固有频率和阻尼比。3 种无序芯体夹层结构质量相差无几,但闭孔泡沫铝夹层结构其各阶固有频率高于开孔泡沫铝和纤维毡夹层结构,这表明闭孔泡沫铝在单位密度下有着更高的抗弯刚度。纤维毡夹层悬臂梁结构阻尼比随阶次升高逐渐升高,但明显低于泡沫夹层结构。此外,闭孔与开孔泡沫铝的加速度幅值曲线与等质量钢板所得到的结果一致,在 0 ~ 1 600 Hz 频率范围内的大部分都为零。而对于纤维毡夹层结构,其加速度导纳比值随频率在 0 处发生上下波动。这说明夹层结构任一横截面上各点振动特性受芯体结构影响较大。

参考文献

[1] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. Progress in materials science, 2001, 46(3/4): 309-327.

[2] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Multifunctionality of cellular metal systems[J]. Progress in materials science, 1998, 43(3): 171-221.

[3] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solid: Structure and properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[4] ASHBY M F, EVANS A G, FLECK N A, et al. Metal foams: A design guide[M]. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000.

[5] 方岱宁,张一慧,崔晓东. 轻质点阵材料力学与多功能设计[M]. 北京:科学出版社.

[6] 潘坚,雷治大. 阻尼减振技术在航天领域中的实践[J]. 宇航材料工艺, 1991(4): 87-90. (PAN Jian, LEI Zhida. Practice of damping and vibration reduction technology in aerospace field[J]. Aerospace materials & technology, 1991(4): 87-90(in Chinese)).

[7] 郭日修,朱云翔. 船舶防振减振技术的进展[J]. 振动与冲击, 1993(3): 36-48. (GUO Rixiu, ZHU Yunxiang. Progress of ship vibration prevention and reduction technology[J]. Journal of vibration and shock, 1993(3): 36-48(in Chinese)).

[8] 马军,王建忠,李爱君,等. 金属纤维烧结毡力学本构关系的试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 42(12): 3710-3715. (MA Jun, WANG Jianzhong, LI Aijun, et al. Experimentally study on the constitutive relations between mechanical properties and relative density of sintered metal fiber felt[J]. Rare metal materials andengineering, 2018, 42(12): 3710-3715(in Chinese)).

[9] 潘艺,胡时胜,凤仪,等. 泡孔尺寸对开孔泡沫铝合金力学性能的影响[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 171-175. (PAN Yi, HU Shisheng, FENG Yi, et al. Cell-size effect on mechanical property of open-cell aluminum alloy foam[J]. Engineering mechanics, 2003, 20(4): 171-175(in Chinese)).

[10] 康颖安. 开孔与闭孔泡沫铝力学性能的试验研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2006.

[11] 何柏灵,赵桂平,卢天健. 复合材料面层-泡沫金属夹芯板的振动及吸能特性分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 228-234. (HE Boling, ZHAO Guiping, LU Tianjian. Analysis of vibration and energy-absorption characteristics of sandwich plates with metallic foam cores and composite face sheets[J]. Acta armamentarii, 2014, 35(2): 228-234(in Chinese)).

[12] 朱秀芳,张君华. 负泊松比蜂窝夹层板的振动特性研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 309-315. (ZHU Xiufang, ZHANG Junhua. Vibration analysis of honeycomb sandwich plate with negative Poisson's ratio[J]. Journal of applied mechanics, 2018, 35(2): 309-315(in Chinese)).

[13] 马超,陈晶,王志国,等. 拉压不同模量硬夹心矩形夹层板的弯曲[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 333-338. (MA Chao, CHEN Jing, WANG Zhiguo, et al. Bending analysis of rectangular sandwich plate with different tension and compression modulus in hard-core[J]. Journal of applied mechanics, 2018, 35(2): 333-338(in Chinese)).

[14] 王鹏飞,刘孟周,刘同辉,等. 泡沫铝板弯曲振动特性数值研究[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(5): 34-38. (WANG Pengfei, LIU Mengzhou, LIU Tonghui, et al. Numerical simulation of bending vibration of aluminum foam plate[J]. Spacecraft environment engineering, 2015, 32(5): 34-38(in Chinese)).

[15] 肖登宝,赵桂平. 金属梯度多孔夹芯板振动特性分析[J]. 航空学报, 2017, 38(6): 135-142. (XIAO Dengbao, ZHAO Guiping. Vibration characteristics analysis of metal graded porous sandwich panel[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2017, 38(6): 135-142 (in Chinese)).

[16] 马银行,陶楠,姜益军,等. 悬臂闭孔泡沫铝板的非线性振动试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2017, 47(4): 732-737. (MA Yinhang, TAO Nan, JIANG Yijun, et al. Experimental study on nonlinear vibration of cantilever closed-cell aluminum foam plates[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2017, 47(4): 732-737 (in Chinese)).

(编辑　张璐)